

2219T87 铝合金焊接接头的常温蠕变行为及其预测

李 壮¹, 付雪松¹, 常志龙², 周文龙¹, 陈国清¹

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116085; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 研究 FSW 和 TIG 焊两种连接态 2219T87 铝合金焊接接头的常温蠕变行为, 分析焊接工艺和蠕变应力条件对蠕变行为的影响。采用蠕变试验机考察试件 300 h 内的拉伸蠕变和压缩蠕变性能, 并通过实验数据曲线拟合预测焊接件在 1×10^5 h 内相应的蠕变量。结果表明: 相同应力水平下, 压缩蠕变量比拉伸蠕变量小。相对于 TIG 焊, FSW 接头的质量更好(屈服强度更高), 其显微组织均匀细小且没有气孔缺陷, 因此表现出的抗蠕变能力更好。当服役应力低于其屈服强度时, FSW 和 TIG 焊接态 2219T87 铝铜合金的 1×10^5 h 蠕变量均不超过 1%。

关键词: 铝合金; 常温蠕变; 搅拌摩擦焊; TIG 焊; 曲线拟合

中图分类号: TG407

文献标志码: A

Creep behavior and forecast of welded joint for 2219T87 aluminum alloy at room temperature

LI Zhuang¹, FU Xue-song¹, CHANG Zhi-long², ZHOU Wen-long¹, CHEN Guo-qing¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The room temperature creep behavior of 2219T87 aluminum alloy welded joints processed by friction stir welding (FSW) or tungsten inert gas welding (TIG) arc welding was investigated. The effects of welding process and creep stress condition on the creep deformation were analyzed. The tensile and compressive creep properties of the joints in 300 h were real-time measured by the creep machine. Based on the measured data, the creep strain of the joints after 1×10^5 h was calculated by curve-fitting method. The results show the creep strain of the samples in compressive test is smaller than that in tensile state under the same stress level. In comparison to TIG arc welding, friction stir welding generates better quality joints (with higher yield strength), which possess a fine, homogenous and no pores defect microstructure. Therefore, the FSW joint has a better creep resistance. In addition, when the creep stress is lower than the yield strength, the creep values of the 2219T87 aluminum alloy welded joints processed by FSW and TIG after 1×10^5 h are less than 1%.

Key words: aluminum alloy; room temperature creep; friction stir welding; TIG arc welding; curve-fitting

蠕变是指结构材料在载荷作用下变形量随时间而逐渐增加的现象, 其形变行为与机理的研究受到人们的重视。研究表明^[1], 金属的常温蠕变呈现非热激活的黏滞性变形特点, 是位错与时间相关的滑动过程。在载荷作用下, 晶体中的可动位错被激活, 而位错的运动水平受晶粒内部黏滞拖拽力控制, 直接影响材料的常温蠕变变形程度和服役寿命。仲莹莹等^[2]对 ZM6 合金的常温蠕变行为进行了研究, 发现 ZM6 常温蠕变

机制为位错滑移机制。马秋林等^[3]研究了工业纯钛 TA2 常温下蠕变第一阶段特性, 认为在常温下低于临界应力值时蠕变不会发生。

2219 铝合金 Al-Cu-Mn 系析出强化型高强铝合金, 具有比强度高、低温和高温力学性能好、断裂韧度高、抗应力腐蚀性能好等特点, 在航空航天、载运工具等领域具有广泛的应用^[4]。2219 铝合金作为航天大型结构件常用材料, 在某些结构中承载贮存周期长,

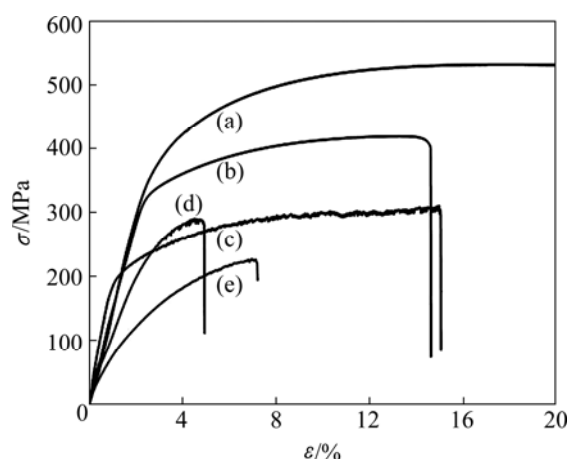


图3 2219T87 铝合金母材及其焊接接头的应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of 2219T87 aluminum alloy and its welded joints: (a) Compressive curve of 2219T87 aluminum alloy; (b) Tensile curve of 2219T87 aluminum alloy; (c) FSW (Parallel to weld line); (d) FSW (Vertical to weld line); (e) TIG (Vertical to weld line)

缩力学性能测试曲线。测试结果显示, 2219T87 母材的拉伸屈服强度为 320 MPa, 伸长率为 14%, 压缩屈服强度为 340 MPa。焊后材料的强度和塑性降低(垂直

焊缝方向), 其中, FSW 焊样品的拉伸强度和伸长率分别降低为 230 MPa 和 5%, 强度约为母材的 72%; TIG 焊样品的拉伸强度和伸长率分别降低为 170 MPa 和 7%, 强度约为母材的 53%。沿平行于焊接方向, FSW 的强度降低到 210 MPa, 但是塑性变形能力没有降低, 伸长率为 15%。

图4所示为2219T87铝合金原始母材和FSW后的显微组织。母材为板条状组织(见图4(a)), 晶粒细长且粗大(宽约25 μm), 在母材晶界和晶内存在大量强化相(见图4(b))。FSW后, 焊核区(见图4(c))受到焊接热循环及搅拌双重作用, 组织形态发生明显变化, 晶粒由板条状组织转变为等轴再结晶组织(见图4(d)), 焊核区晶粒尺寸均匀且细小(约为10 μm)。此外, 在焊接热循环和机械搅拌的梯度作用下, 焊缝区内细小沉淀相发生不同程度的再次固溶、析出和长大过程, 当 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 过渡相长大到一定尺寸时, 与基体 $\alpha(\text{Al})$ 相的共格关系被破坏, 形成无共格的 θ 相, θ 相的形成、聚集和长大程度的不同将导致焊缝各区域性能不同^[13]。

图5所示为2219T87铝合金TIG焊后不同区域的组织形貌。TIG焊包含3种特征组织区, 分别为焊缝区、融合区和热影响区, 如图5(b)所示。母材为板条

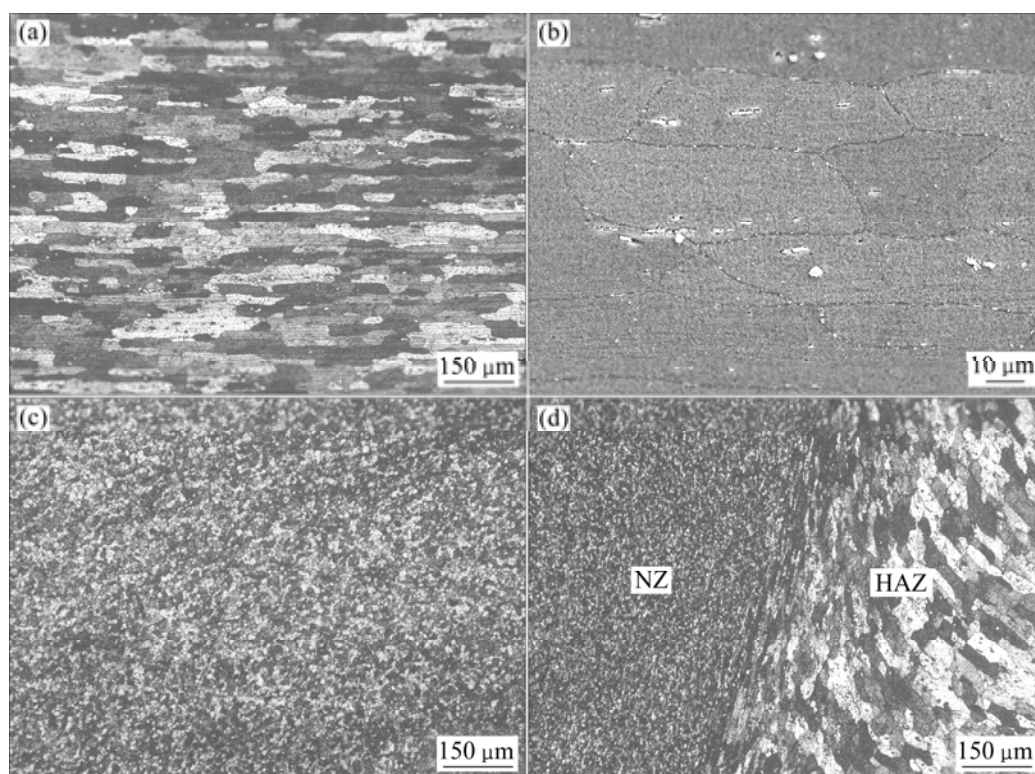


图4 2219T87 铝合金母材和FSW接头的显微组织

Fig. 4 Microstructures of 2219T87 aluminum alloy and FSW joints: (a) Optical micrograph of parent metal; (b) SEM image of parent metal; (c) Optical micrograph of nucleation zone (NZ); (d) Optical micrograph of NZ and heat affected zone (HAZ)

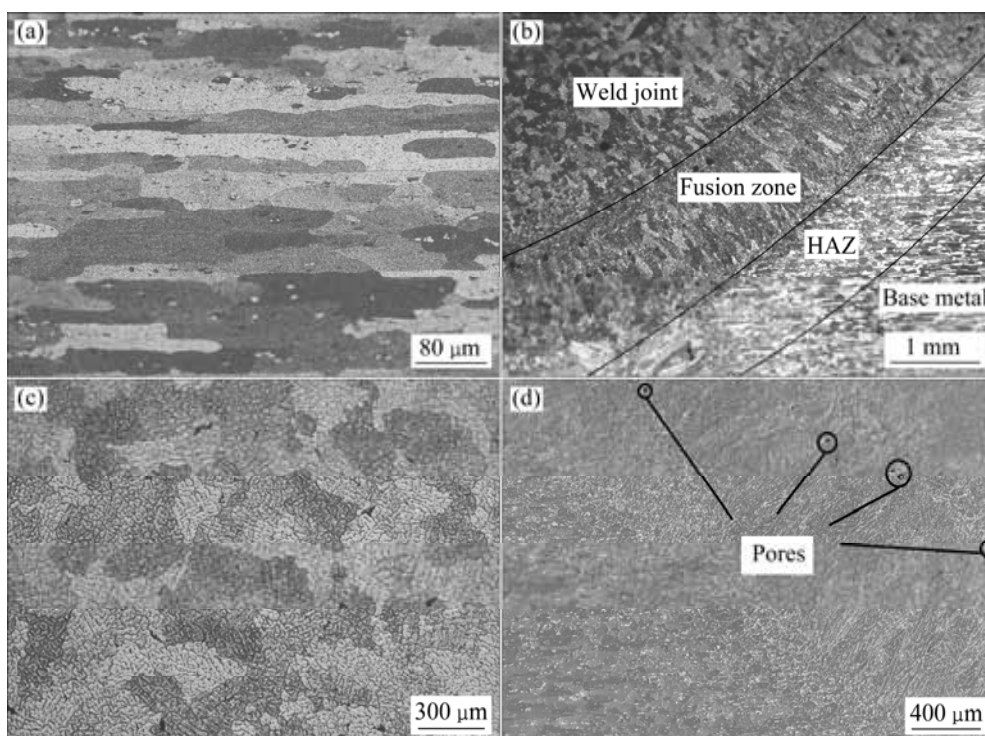


图 5 2219T87 铝合金 TIG 接头的组织显微

Fig. 5 Microstructures of 2219T87 aluminum alloy TIG welded joints: (a) Optical micrograph of parent metal; (b) Optical micrograph at edge of weld zone; (c) Optical micrograph of weld joint zone; (d) SEM image of weld zone

状组织, 晶粒沿轧制方向较长 (见图 5(a))。焊缝组织以 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体为基体, 在基体内分布着许多颗粒较小的 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相, 起到强化基体的作用^[14]。融合区的显微组织为柱状晶, 且沿垂直于融合线向焊缝中心扩展 (见图 5(b)), 这是由于在焊接过程中焊缝金属凝固时, 晶体首先在与母材相接的融化边界处连续长大。焊缝中心晶体形态为等轴晶, 晶粒尺寸约为 $100\ \mu\text{m}$ (见图 5(c))。TIG 接头焊接区存在许多气孔 (见图 5(d)), 这些气孔的存在不仅降低焊缝的有效承载能力而且容易形成应力集中, 使得焊缝的强度和韧性降低。

2.2 2219T87 铝合金的室温蠕变规律与性能

2.2.1 原始态试样的蠕变曲线

图 6 所示为 2219T87 铝合金经 300 h、实验应力分别为 200 和 300 MPa 蠕变的实验数据、拟合曲线以及拟合结果, 图中拟合曲线是通过公式 $\varepsilon = \varepsilon_0 + a \ln(bt+1)$ 对实验数据点进行拟合得到, 拟合曲线与采集数据点吻合较好。实验数据显示, 2219T87 铝合金的常温蠕变行为为具有典型的常温蠕变曲线特征。300 h 内, 蠕变开始的短时间内发生的变形量占整个变形量的绝大部分, 决定了整个蠕变的趋势。常温蠕变的最初蠕变速率较大, 随着蠕变进行, 蠕变速率急剧降低。随着应

力水平提高, 试样蠕变量增加, 200 和 300 MPa 拉应力下, 300 h 蠕变量分别为 0.368% 和 0.634%。相同应力水平下, 压缩蠕变量比拉伸蠕变量低。在 200 和 300 MPa 压应力下, 300 h 蠕变量分别为 0.328% 和 0.558%。

2.2.2 FSW 试样的蠕变

图 7 所示为垂直焊缝和平行焊缝方向 FSW 试样经 300 h、实验应力分别为 100 和 200 MPa 时的蠕变实验数据、拟合曲线以及拟合结果。由图 7 可见, 拟合曲线与数据点吻合较好。无论是组织均匀的平行焊缝试样还是组织不均匀的垂直焊缝试样, 其蠕变曲线都具有典型常温蠕变曲线的对数变化规律。平行焊缝试样在 100 MPa 时的蠕变现象并不明显, 曲线变化相对平直, 300 h 蠕变量为 0.163%; 应力提高到 200 MPa 时, 蠕变量为 0.354%。垂直焊缝试样在压力为 200 MPa 时蠕变量较平行焊缝试样明显增大, 达到 0.625%。

2.2.3 TIG 试样的蠕变曲线

图 8 所示为 TIG 焊垂直焊缝方向试样经 300 h、应力分别为 100 和 150 MPa 蠕变实验数据、拟合曲线及拟合结果。由图 8 可见, 拟合曲线与数据点吻合较好, 蠕变曲线同样具有典型常温蠕变曲线的对数变化规律。经 300 h 蠕变后, 应力为 100 MPa 时试样品

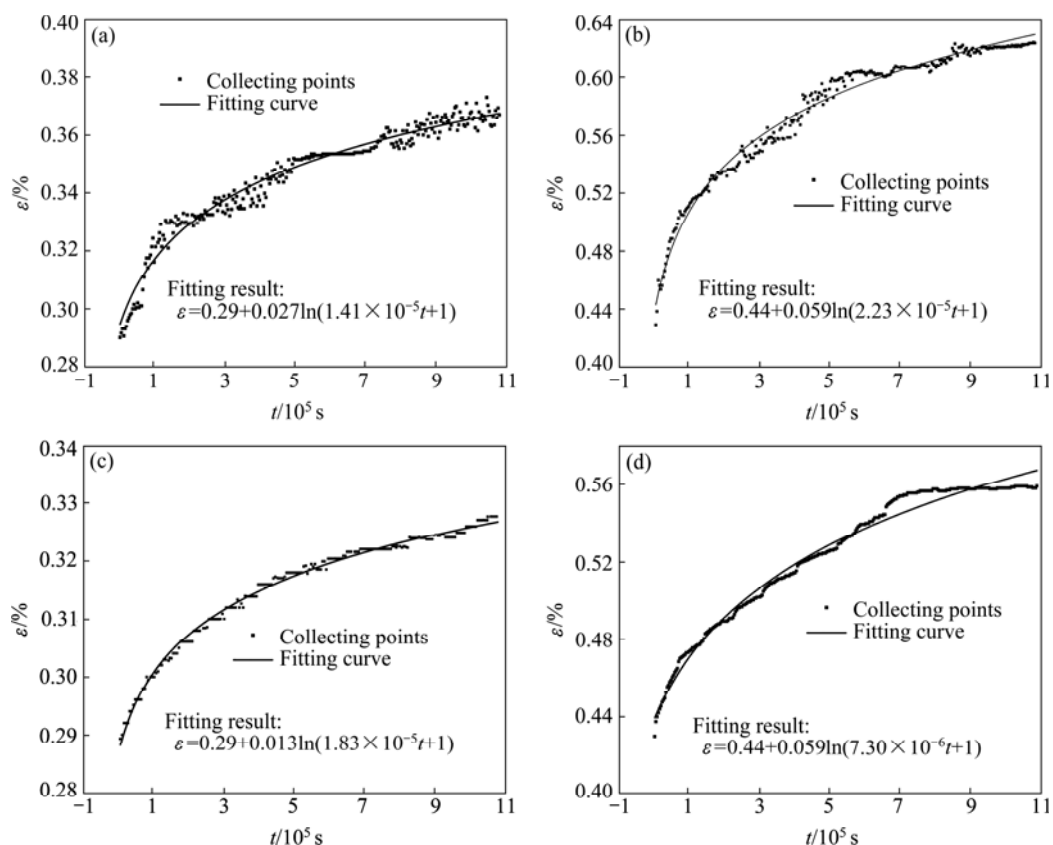


图 6 不同载荷下 2219T87 铝合金的蠕变曲线及其拟合曲线

Fig. 6 Creep curves and fitting curves of 2219T87 aluminum alloy under different loads: (a) Tensile stress of 200 MPa; (b) Tensile stress of 300 MPa; (c) Compressive stress of 200 MPa; (d) Compressive stress of 300 MPa

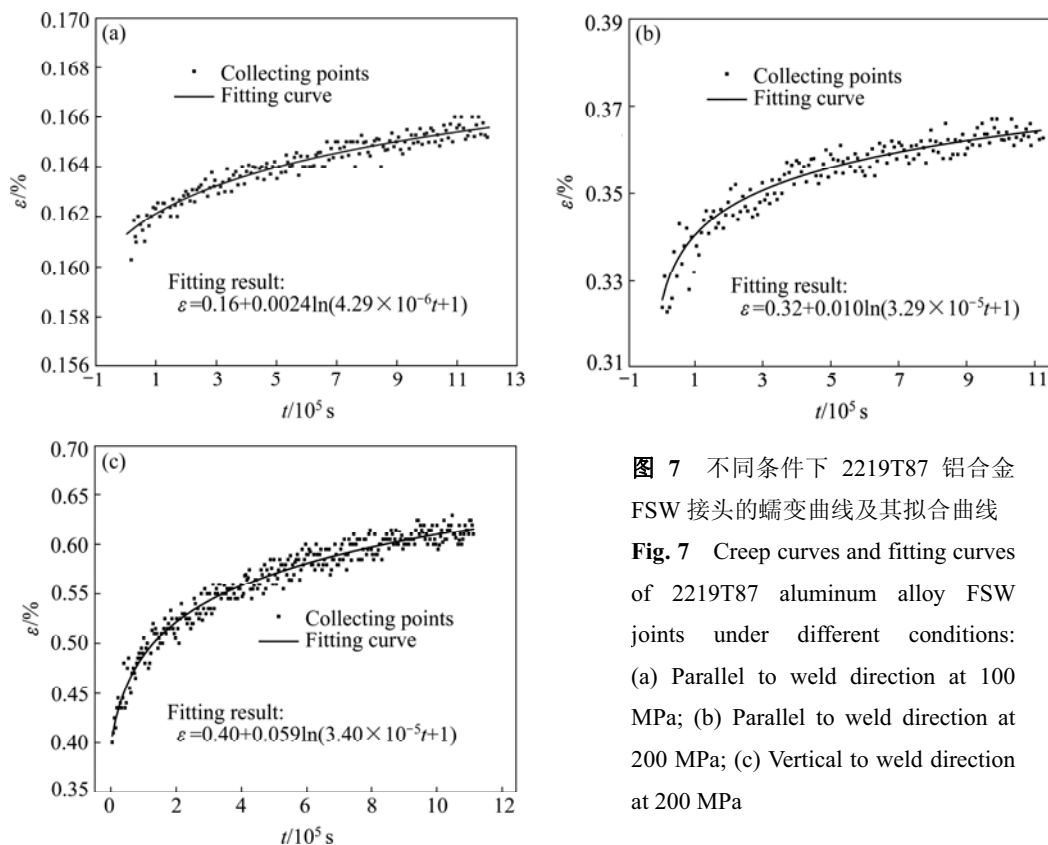


图 7 不同条件下 2219T87 铝合金 FSW 接头的蠕变曲线及其拟合曲线

Fig. 7 Creep curves and fitting curves of 2219T87 aluminum alloy FSW joints under different conditions: (a) Parallel to weld direction at 100 MPa; (b) Parallel to weld direction at 200 MPa; (c) Vertical to weld direction at 200 MPa

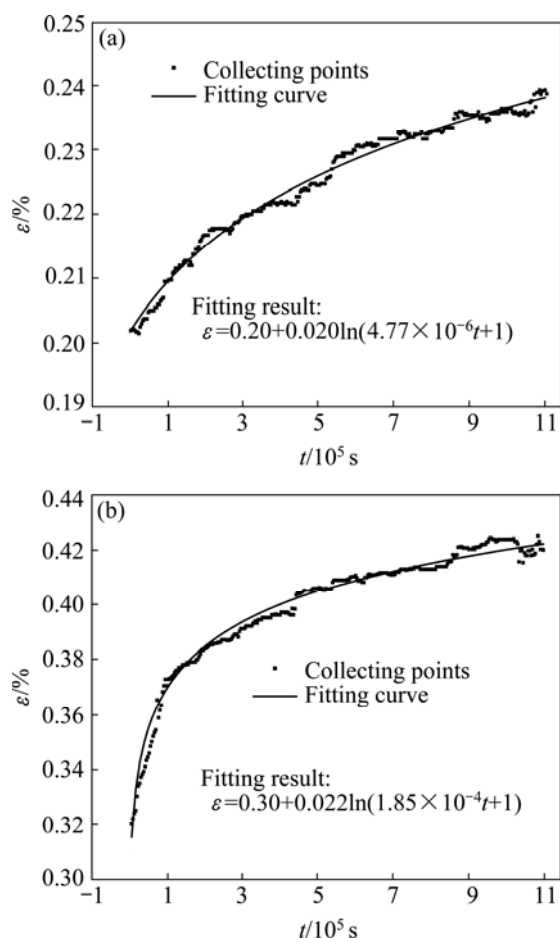


图 8 2219T87 铝合金 TIG 焊接头的蠕变曲线及其拟合曲线
Fig. 8 Creep curves and fitting curves of 2219T87 aluminum alloy TIG welded joints: (a) Vertical to weld direction at 100 MPa; (b) Vertical to weld direction at 150 MPa

蠕变量为 0.242%，应力提高到 150 MPa 蠕变量可达 0.420%。从图 6~8 可见，母材、FSW 和 TIG 焊试样的常温蠕变特征，都符合典型常温蠕变曲线分为两个阶段的规律。第一阶段蠕变速率较大，几乎与时间呈正比关系增加，主要是由瞬间加载完成后弹性后效引起的滞弹性蠕变；第二阶段蠕变则相对缓慢，滞弹性变形结束，发生塑性变形才表现出来，占居主导地位。

2.2.4 蠕变后力学性能测试

图 9 所示为经 200 MPa、300 h 蠕变后 2219T87 铝合金试样与原始样的力学性能曲线。结果显示，长时间蠕变后，试样的强度略有增加，伸长率明显下降。其原因是铝合金蠕变过程中产生少量塑性变形时，造成大量位错缠结在一起，最终形成包状位错组织，包壁位错密度高，包内位错密度低。研究认为^[15]形成位错包导致第二相组织分布不均匀，提高了合金屈服强度，降低了塑性。

图 10 所示为 FSW 平行焊缝试样和垂直焊缝试样蠕变前后的力学性能曲线。测试结果显示，蠕变后试

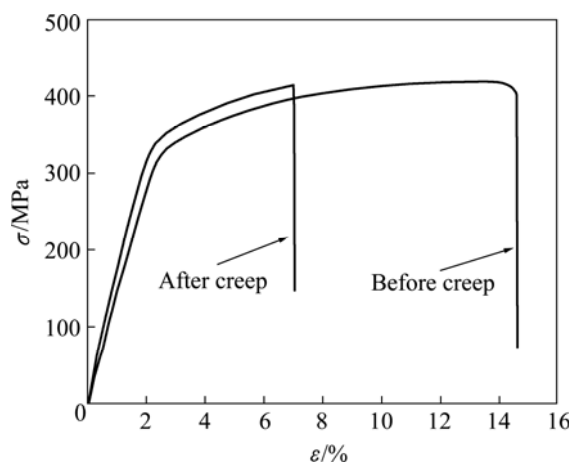


图 9 蠕变前后 2219T87 铝合金的应力-应变曲线
Fig. 9 Stress-strain curves of 2219T87 aluminum alloy before and after creep tests

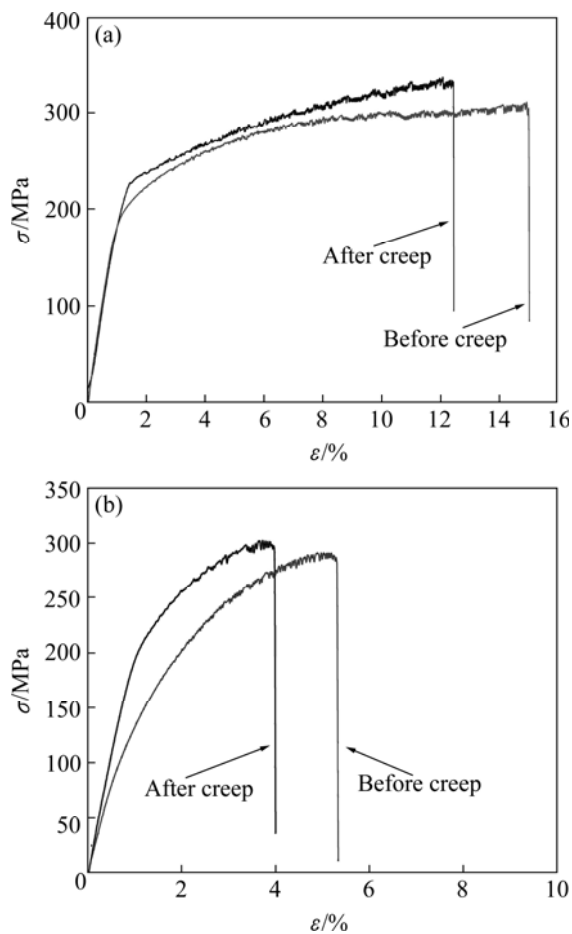


图 10 蠕变前后 FSW 接头的应力-应变曲线
Fig. 10 Stress-strain curves of FSW joints before and after creep tests: (a) Parallel to weld direction; (b) Vertical to weld direction

样的断裂强度都略有增加, 伸长率有不同程度的降低。FSW 的热机影响区受到搅拌针的搅拌破碎作用较小, 在热循环的作用下发生晶内析出相偏聚长大, 晶内强化作用减弱, 且热机影响区沿晶界分布的析出相造成晶界处发生应力集中, 致使晶界弱化力学性能明显下降^[16], 所以, 垂直焊缝试样蠕变前的伸长率也明显较低, 如图 3 所示。而蠕变后同样因为位错运动的作用其强度增加, 伸长率降低。

2.3 2219T87 铝合金的蠕变特征分析与蠕变量预测

将拟合后所得参数代入蠕变计算公式, 可用外推算法推算此应力状态下更长时间的蠕变量。表 2 所列为在恒载应力作用下 2219T87 母材、FSW 和 TIG 焊试样在 300 和 1×10^5 h 时的应变量。研究发现, 铝合金母材恒载 300 h 所产生的应变量已经占 1×10^5 h 应变量的 70% 左右。这一现象符合普遍认同的 Alden 常温态蠕变理论机理^[1]: 金属的塑性变形主要是由于金属材料内部的位错运动而产生的。当金属材料加载到某一设定值并保持恒定载荷时, 产生了一定量的可动位错, 这些可动位错在恒载开始时发生滑移, 材料由此出现变形。但随着时间的延长, 可动位错滑移遇到阻碍转变为不动位错, 可动位错数量越来越少, 即出现材料蠕变变形量和变形速度随时间延长而减小的现象。此外, 相同应力条件下压缩状态比拉伸状态的蠕变量小, 这是因为相同应力状态下压缩蠕变的位错塞积更快, 因此蠕变速率较低, 蠕变量较小。外推拟合计算显示, 材料在屈服强度内使用, 其 1×10^5 h 变形量不超过 1%。实验结果表明, 焊接导致材料的抗蠕变能力降低。在 200 MPa 应力水平时, 实验测得母材 300 h 实测变形量为 0.368%, FSW 试样(垂直焊缝方向)的蠕变量为 0.625%; 而 TIG 焊接试样在 150 MPa 时蠕变量为 0.420%, 超过母材的蠕变量。同时, 研究发现, 试样蠕变行为与焊缝位向密切相关。对于 FSW 试样, 当焊缝方向与试样平行时, 200 MPa 下试样 300 h 后蠕变量为 0.354%, 比母材蠕变量略低。对于平行焊缝试样, 试样主承载受力区组织均匀, 如图 2(b)所示, 呈晶粒细小、屈服强度高的焊核区显微组织特征。对于 FSW 试样, 相对 1×10^5 h 而言, 平行焊缝试样 300 h 蠕变量已占 85%, 而垂直焊缝试样 300 h 蠕变量只占 65%, 说明垂直焊缝试样在 300 h 后蠕变现象依然明显, 材料抗蠕变能较差。这是因为垂直焊缝试样包含热影响区, FSW 的热影响区强度和硬度比母材和焊核区的低^[17], 所以, 在蠕变过程中容易产生塑性变形, 使材料抗蠕变能力降低。

表 2 外推法计算所得不同材料的 1×10^5 h 蠕变量

Table 2 1×10^5 h creep values of different materials calculated by extrapolation method

Material	Stress/ MPa	$\varepsilon(300 \text{ h})/$ %	$\varepsilon(1 \times 10^5 \text{ h})/$ %
Parent metal	+200	0.368	0.520
Parent metal	+300	0.634	0.970
Parent metal	-200	0.328	0.404
Parent metal	-300	0.558	0.905
FSW(Parallel to weld line)	+100	0.163	0.178
FSW(Parallel to weld line)	+200	0.354	0.414
FSW(Vertical to weld line)	+200	0.625	0.955
TIG(Vertical to weld line)	+100	0.242	0.349
TIG(Vertical to weld line)	+150	0.420	0.544

“+” represents tensile stress; “-” represents compressive stress.

3 结论

1) 2219T87 铝合金及其焊接材料具有典型常温蠕变特征, 符合常规对数变化规律, 相同应力下压缩蠕变的蠕变量比拉伸蠕变的小。外推拟合计算显示, 材料在屈服强度内使用, 其 1×10^5 h 变形量不超过 1%。

2) 焊接后的 2219T87 铝合金强度降低, 其抗蠕变能力降低, 长时间恒载蠕变量增大。搅拌摩擦焊(FSW)接头强度可达母材的 72% 左右, 而 TIG 焊接头强度只能达到母材的 53%。

3) 相对于 TIG 焊, FSW 焊接接头的质量更好(屈服强度更高), 其显微组织均匀细小且没有气孔缺陷, 因此, 其抗蠕变性能更好。

4) 相同应力水平下, 2219T87 铝合金及其焊接态材料压缩蠕变量比拉伸蠕变量小。2219T87 铝合金及其焊接态材料经过长时间蠕变后, 屈服强度略有增加, 断后伸长率明显下降。

REFERENCES

- [1] ALDEN T H. Theory of plastic and viscous[J]. Metall Trans, 1987, 18: 811-826.
 - [2] 仲莹莹, 张新明, 邓运来, 许树芳, 余艳兵, 沈 枫. ZM6 合金室温蠕变机理研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(4): 378-380.
- ZHONG Ying-ying, ZHANG Xin-ming, DENG Yun-lai, XU Shu-fang, YU Yan-bing, SHEN Feng. Creep mechanism of Mg-Nd-Zn-Zr(ZM6) alloy at ambient temperature[J]. Special

- Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(4): 378–380.
- [3] 马秋林, 张莉, 徐宏, 王志文. 工业纯钛 TA2 室温蠕变第 1 阶段特性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(1): 11–14.
MA Qiu-lin, ZHANG Li, XU Hong, WANG Zhi-wen. Primary creep characteristic of TA2 at room temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(1): 11–14.
- [4] 吴鸿燕, 邢丽, 陈玉华, 黄春平. 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头的断裂部位特征[J]. 金属热处理, 2011, 36(5): 90–93.
WU Hong-yan, XING Li, CHEN Yu-hua, HUANG Chun-ping. Fracture location characteristics of 2219 aluminum alloy friction stir welded joints[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(5): 90–93.
- [5] SQUILLACE A, de FENZO A, GIORLEO G, BELLUCCI F. A comparison between FSW and TIG welding techniques modifications of microstructure and pitting corrosion resistance of AA2024-T3 butt joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152(1): 97–105.
- [6] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Mater Sci Eng B, 2005, 50(12): 178–185.
- [7] 王训宏, 王快社, 徐可为, 胡锴. LF2 铝合金搅拌摩擦焊接头的疲劳特性[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(6): 379–380.
WANG Xun-hong, WANG Kuai-she, XU Ke-wei, HU Kai. Fatigue properties of friction stir welded aluminum alloy LF2[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(6): 379–380.
- [8] 沈洋, 王快社, 吕爽, 孙鹏. 7075 铝合金搅拌摩擦焊研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(2): 145–147.
SHEN Yang, WANG Kuai-she, LÜ Shuang, SUN Peng. A study on friction stir welds of 7075 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(2): 145–147.
- [9] ERICSSON M, SANDSTROM R. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(12): 1379–1387.
- [10] 李博, 沈以赴, 胡伟叶. 伸缩式搅拌头厚铝板搅拌摩擦焊缺陷及其补焊工艺[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(1): 62–71.
LI Bo, SHEN Yi-fu, HU Wei-ye. Friction-stir welded defects and repairing weld process of thick aluminum plates with telescopic stir-pin[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 62–71.
- [11] 王希靖, 孙桂苹, 张杰, 徐成, 李树伟, 牛勇. 焊后热处理对高强铝合金搅拌摩擦焊接头的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(3): 484–489.
WANG Xi-jing, SUN Gui-ping, ZHANG Jie, XU Cheng, LI Shu-wei, NIU Yong. Effects of heat treatment after welding on friction stir welding joints of high-strength aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(3): 484–489.
- [12] 聂德福, 赵杰, 张俊善. 一种估算结构钢室温蠕变的方法[J]. 金属学报, 2011, 47(2): 179–184.
NIE De-fu, ZHAO Jie, ZHANG Jun-shan. An approach to estimate room temperature creep of structural steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(2): 179–184.
- [13] 周鹏展, 李东辉, 贺地求, 邓航. 2219-T87 厚板搅拌摩擦焊沿厚度方向的性能差异[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 5–8.
ZHOU Peng-zhan, LI Dong-hui, HE Di-qiu, DENG Hang. Through thickness diversity of properties in friction welded 2219-T87 thick aluminum alloy plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 5–8.
- [14] 宋民远, 赵海云, 曲文卿, 王炜. 2219 铝合金及变极性 TIG 焊焊接头的力学性能[J]. 铝加工, 2010(3): 30–33.
SONG Min-yuan, ZHAO Hai-yun, QU Wen-qing, WANG Wei. Mechanical properties of 2219 aluminum alloy and TIG welding joints[J]. Aluminum Fabrication, 2010(3): 30–33.
- [15] 湛利华, 李杰, 黄明辉, 李炎光. 2524 铝合金的蠕变时效行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 320–326.
ZHAN Li-hua, LI Jie, HUANG Ming-hui, LI Yan-guang. Creep ageing behavior of 2524 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(2): 320–326.
- [16] 张海. 2219 铝合金 FSW-VPPA 交叉焊缝组织性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 31–32.
ZHANG Hai. Research on microstructure and mechanical properties of intersection weld of 2219 aluminum by FSW-VPPA welding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 31–32.
- [17] 王春炎, 曲文卿, 姚君山, 赵海云. 2219T-87 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 78–80.
WANG Chun-yan, QU Wen-qing, YAO Jun-shan, ZHAO Hai-yun. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded 2219-T87 aluminum alloy joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(10): 78–80.

(编辑 陈卫萍)